

БОЛОТОВ Михаил Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технологий производства двигателей.

Научный консультант:

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Захаров Олег Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении»;

Леонтьев Михаил Константинович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры 203 «Конструкция и проектирование двигателей»;

Нихамкин Михаил Шмерович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Авиационные двигатели».

Ведущая организация:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 11 октября 2024 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Bolotov_M_A_Pazrabotka_metodovcozdaniija.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов А. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» предусматривает как повышение конкурентоспособности отечественной продукции, так и создаваемых технологий на основе цифровизации жизненного цикла изделий. Наукоёмкое производство немыслимо без повышения производительности труда, снижения затрат на разработку и производство продукции, что предусматривает не только «технологическое обновление промышленности», но также разработку методов и средств измерений, «создание эталонов нового поколения» (государственная программа РФ "Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности"), включаемых в технологическую цепочку создания продукции.

Решение задачи повышения эксплуатационных характеристик ГТД включает целый комплекс мероприятий, два из которых рассматриваются в диссертационной работе. Первое из них связано с прогнозированием и обеспечением геометрической точности сборочных параметров узлов. Второе – с балансировкой деталей и узлов ГТД. Многие из роторов существующих и перспективных ГТД являются гибкими, что приводит к усложнению технологии их изготовления, сборки и балансировки. В этой связи перспективным направлением совершенствования технологий производства ГТД является разработка «цифровых двойников» технологических операций, которые могут быть использованы для определения оптимальных условий их выполнения при учёте реальной геометрии заготовок, деталей и узлов.

Повышение производительности и точности технологических процессов изготовления деталей ГТД и технологической оснастки может быть достигнуто за счёт управления параметрами размерной обработки заготовок с использованием цифровых моделей процессов. Корректировка размерных параметров основных операций обработки заготовок позволит уменьшить погрешности формообразования, что создаёт возможности для снижения величины припуска на последующих операциях. Перераспределение припуска между этапами обработки заготовок в пользу более производительных этапов повысит общую производительность изготовления деталей.

Повысить качество технологических процессов сборки и балансировки роторов ГТД можно за счёт использования цифровых моделей для определения оптимальных вариантов комплектования и пригонки деталей узлов. Трудоёмкость сборки узлов может быть снижена вследствие уменьшения или исключения «предварительных сборок», предусмотренных в технологическом процессе. В цифровом производстве повышение геометрической точности узлов можно обеспечить за счёт сборки с оптимизированным вариантом взаимного положения комплектующих деталей, определённого компьютерным анализом возможных вариантов их ориентации в узле. Значимой проблемой изготовления ГТД является повышенная вибрация, выявляемая при стендовых испытаниях. Для выявления повышенного уровня вибраций и подготовки предложений по их снижению на этапах комплектования и сборки узлов могут быть использованы цифровые модели основных сборочных единиц ГТД. Эти цифровые модели, прежде всего, должны учитывать информацию о реальной геометрии поверхностей заготовок, деталей и узлов. Формирование цифровых моделей возможно на основе определения необходимого и достаточного объёма данных измерений. В этой связи важную роль играет разработка эталонов, моделей и методов обработки результатов измерений, используемых для определения геометрических параметров объектов и математического описания их поверхностей. Описание технологических и сборочных размерных связей с

использованием информации о реальной геометрии заготовок, деталей и узлов требует разработки достоверных моделей сопряжений их поверхностей.

Таким образом, существенное повышение технических показателей производства ГТД возможно за счёт разработки и использования комплекса цифровых моделей процессов и операций, учитывающих реальную геометрию деталей и узлов. Изложенное позволяет заключить, что тема диссертационной работы – «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» – является актуальной для современного авиадвигателестроения.

Степень разработанности темы. Проблемами обеспечения геометрической точности и повышения производительности изготовления узлов ГТД занимались видные отечественные учёные: Б.С. Балакшин, Н.А. Бородачев, Б.М. Базров, А.А. Гусев, А.М. Дальский, А.С. Шевелев, И.А. Иващенко, В.А. Захаров, Ф.И. Демин, Н.М. Капустин, И.М. Колесов, В.С. Корсаков, В.В. Косилов, А.А. Маталин, В.Г. Митрофанов, М.П. Новиков, В.В. Павлов, А.В. Подзей, А.Ф. Прохоров, А.П. Соколовский, Ю.С. Елисеев, Н.Д. Проничев, В.Ф. Безъязычный, А.Н. Лунев, В.В. Непомилуев, М.К. Леонтьев, М.Ш. Нихамкин, А.А. Коряжкин, Л.А. Кашуба и другие. Анализ публикаций, посвящённых данному вопросу, позволил сделать следующие выводы: 1) разработка технологических процессов производства ГТД выполняется без учёта в них реальной геометрии деталей и контактного взаимодействия их поверхностей в собранном узле; 2) технологические процессы сборки роторов ГТД разрабатываются без учёта подробного анализа взаимного влияния положения каждой детали на уровень неуравновешенностей ротора.

Цель работы. Повышение точности и снижение трудоёмкости технологических процессов сборки роторов ГТД за счёт разработки методов для обеспечения требуемой точности сборки и снижения неуравновешенностей роторов, основанных на использовании в производственном процессе действительных моделей деталей¹, учитывающих результаты измерения их геометрии, рассчитанные контактные деформации при сборке, а также динамические параметры сборочных единиц в составе роторов.

Задачи исследования:

1. Разработка состава и основных принципов создания действительных моделей деталей и узлов для совершенствования технологий производства ГТД по повышению управляемости выполнения сборочных операций, их точности и производительности.

2. Разработка обобщённой методики создания действительных моделей деталей и узлов ГТД с учётом специфики сборочных параметров.

3. Разработка метода определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС), которые учитывают сопряжения поверхностей объектов, то есть их макрогеометрию.

4. Повышение точности расчётов сборочных параметров узлов ГТД на основе анализа и синтеза их размерных связей с использованием действительных моделей деталей, учитывающих контактные взаимодействия деталей и их деформации при сборке.

¹ Действительная модель – введённый термин, обозначающий цифровую модель сборочных единиц и/или производственных процессов технических объектов, содержащую совокупность действительных размеров, технических требований, физико-механических свойств, функциональных и иных условий работы, обладающую свойствами необходимости и достаточности её информационного содержания для решения конструкторских, технологических и иных задач.

5. Автоматизация операции пригонки деталей при сборке узлов с использованием действительных моделей деталей, обеспечивающая повышение точности их взаимного расположения и увеличение площади контакта поверхностей.

6. Разработка метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, применяемой для определения оптимального взаимного расположения деталей и сборочных единиц в окружном направлении. Оптимальное расположение деталей и сборочных единиц в окружном направлении определяется, исходя из обеспечения противонаправленности возмущающих воздействий, возникающих от их неуравновешенностей.

7. Разработка и верификация модели определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД для снижения трудоёмкости и повышения точности сборочных операций.

Научная новизна работы:

1. Предложены основные принципы создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и узлов для цифровизации технологий производства ГТД, отличающиеся от существующих цифровых моделей сборочных единиц выявленными и учтёнными требованиями к необходимости и достаточности их информационного содержания, а также учётом особенностей формируемых размерных связей для повышения управляемости выполнения сборочных операций, точности и производительности технологических процессов.

2. Предложен метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, отличающийся от существующих методов анализом возможных сопряжений контактных поверхностей измеряемых объектов, которые определяют особенности формируемых размерных связей с учётом деформаций деталей в ходе их контактного взаимодействия при сборке.

3. Разработан метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов для расчётов размерных связей, отличающийся от известных методов использованием действительных моделей геометрических объектов, позволяющий определять их деформации при сборке с учётом условий выполнения технологических операций.

4. Разработан метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей, отличающийся от существующих методов повышением площади контакта сопрягаемых поверхностей деталей и обеспечением точности их взаимного расположения.

5. Разработан метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, отличающийся от существующих методов способом расчёта их оптимального положения в окружном направлении за счёт обеспечения противонаправленности возмущающих воздействий от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц.

6. Разработаны алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД с целью повышения точности и снижения трудоёмкости сборки, отличающиеся от существующих решений возможностью комплексного учёта требований к точности сборочных параметров и величине дисбаланса узлов.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в предложенных принципах определения информационного содержания, создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и сборочных единиц ГТД с целью повышения управляемости выполнением сборочных операций, точности и производительности технологических процессов сборки, а также улучшения технических параметров изделий. Формирование действительных моделей

деталей и узлов выполняется на основе измерений с учётом их информационной достаточности и необходимости, а также особенностей размерных связей в изделиях, определяемых содержанием технологической операции и/или этапом жизненного цикла изделия. Предложены эффективный метод и комплекс специальных моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов, в частности для прогнозирования параметров взаимодействия контактирующих поверхностей деталей, применяемые для выполнения расчётов их размерных связей. Разработан метод снижения уровня вибраций роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, в основе которого заложен способ обеспечения противонаправленности возмущающего воздействия от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы заключается в разработке цифровой технологии на основе программной реализации предложенных методов и моделей, обеспечивающих повышение достоверности размерного анализа и геометрической точности технологических операций в производстве, снижение уровня вибраций роторов при эксплуатации ГТД.

Область исследования соответствует п. 9 – Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку и управление производством, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита – паспорта научной специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки).

Методология и методы исследований.

Решение поставленных задач осуществлялось теоретическими исследованиями, выполненными на основе методов математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей, математической статистики, аналитической геометрии, вычислительной математики, теории колебаний и конечных элементов с помощью разработанных авторских модулей в программном обеспечении MATLAB, Visual Studio, Python, а также программных комплексов, реализующих расчеты напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов: «NX» и «ANSYS». Экспериментальные исследования выполнялись с использованием поверенных средств измерения и аттестованного испытательного оборудования, а также разработанных разгонно-балансирующего стенда и аппаратно-программного комплекса для измерения геометрии лопаток ГТД. Обработка данных исследований производилась с использованием методов статистического анализа.

Объект исследований. Технологии сборки роторов газотурбинных двигателей летательных аппаратов.

Предмет исследований. Размерные связи в технологических процессах сборки узлов, координатные измерения, обработка и анализ геометрических данных, неуравновешенность роторов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Состав, информационное содержание и основные принципы создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и сборочных единиц для совершенствования технологий производства ГТД по управляемости, точности и производительности.

2. Метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, позволяющий учитывать параметры сопряжений контактных поверхностей измеряемых объектов.

3. Метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, применяемых при выполнении расчётов размерных связей.

4. Метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей, позволяющий повысить площадь контакта поверхностей и обеспечить точность взаимного расположения деталей.

5. Метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, учитывающей погрешности сборочных параметров, за счёт обеспечения противонаправленности возмущающего воздействия от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц, путём выбора оптимального положения деталей в окружном направлении.

6. Модель определения рациональных условий сборки узлов (рационального положения собираемых деталей в окружном направлении), в которой предварительно используется метод машинного обучения для сужения границ области решения, а затем производится уточнение определяемых параметров с применением численных моделей сопряжения деталей.

7. Алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД для повышения точности их сборочных параметров и снижения трудоёмкости операций сборки, предусматривающие комплексный учёт требований к точности сборочных параметров, допустимому дисбалансу.

Достоверность полученных результатов обосновывается путём корректно поставленных задач исследования и научной цели, правильностью использования математического аппарата, теоретических методов и зависимостей, принятых допущений и ограничений, использованием в процессе исследований поверенных средств измерения, аттестованного испытательного оборудования и сертифицированного программного обеспечения, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов исследования. Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных конференциях: международной научной конференции «40–е Гагаринские чтения», г. Москва, Московский авиационный институт, 7–11 апреля 2014 г.; международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии ПИТ-2017», г. Самара, Самарский университет 14–16 марта 2017 г.; международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике», г. Томск, Томский политехнический университет, 27–29 ноября 2017 г.; международной научно-технической конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018), г. Самара, Самарский университет, 24–27 апреля 2018 г.; IV международной научной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство», г. Казань, 31 мая, 2019 г.; III международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 ноября, 2020 г.; VI международной конференции и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020), 26–29 мая, 2020 г. Цикл научных работ по теме «Разработка и внедрение на предприятиях Самарской области методов создания и использования действительных моделей деталей и узлов газотурбинных двигателей для прогнозирования и обеспечения уровня их вибраций» был удостоен губернской премии в области науки и техники за 2020 год.

Получен патент на изобретение «Устройство для автоматизированного контроля соосности и центровки механических конструкций» №2639993 от 25.12.2017 г. Зарегистрированы программы для ЭВМ: «Программный комплекс для моделирования процесса

координатных измерений геометрических параметров деталей машиностроения» №2016616259 от 13.04.2016 г.; «Программный модуль для вычисления (определения) дисбаланса роторов на основе их полигональных 3D моделей» №2018661116 от 31.08.2018 г.; «Программный модуль для виртуального уравнивания роторов» №2018661033 от 31.08.2018 г.; «Программный модуль для цифрового прогнозирования вибрационных параметров роторов» №2019661901 от 11.09.2019 г.; «Программный модуль для расчёта параметров сопряжения реальных поверхностей собираемых деталей» №2020618835 от 05.08.2020 г.

Реализация результатов работы.

Результаты работы были внедрены на предприятиях: ПАО «ОДК-Кузнецов» (акт от 28.02.2024 г.) при выполнении балансировки ротора методом двух сборок; АО «Металлист-Самара» (акт от 26.02.2024 г.) при снижении неуравновешенностей ротора НД в ходе его балансировки с использованием действительных моделей узлов; ООО «Газпром трансгаз Самара» (акт от 12.02.2024 г.) при создании 3D моделей и улучшении технологии сборки и ремонта ротора и камеры сгорания ГТД на основе использования результатов измерений. Результаты работы внедрены в учебный процесс.

Разработка теоретических положений, изложенных в диссертационной работе, проводилась по договорам и грантам: «Разработка комплекса технологий ремонта и восстановления функциональных характеристик ответственных деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок», 2015 – 2017 г., идентификатор RFMEFI57815X0131, в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (ответственный исполнитель); «Разработка алгоритма машинного обучения при использовании данных оптических или лазерных сканеров для управления роботизированными системами промышленного и двойного назначения», в рамках Государственного задания, 2018 г., шифр проекта 9.11560.2018/10.11 (руководитель); «Обеспечение качества изделий посредством разработки и использования их цифровых двойников в «Умных» фабриках будущего», в рамках Государственного задания, 2018 – 2019 г., шифр проекта 9.11978.2018/11.12 (руководитель); «Разработка систем мониторинга и предиктивной аналитики производственных систем с использованием технологии машинного зрения и обучения», в рамках Государственного задания, 2024 – 2026 г. шифр проекта FSSS-2024-0019 (исполнитель). Созданные методы применяются в учебном процессе Самарского университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 100 научных работ, в том числе 32 статьи в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК России, и 45 статей в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 252 наименований и восьми приложений. Общий объём диссертации составляет 361 страницу, 156 рисунков и 39 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность исследуемой научно-технической проблемы, сформулирована цель диссертационной работы, определены положения, выносимые автором на защиту, перечислены основные положения, характеризующие научную новизну, практическую значимость полученных результатов, содержатся сведения о реализации результатов работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В первой главе приведён статистический анализ причин повышенной вибрации изделий. Основными причинами съёма изделий с кратковременных испытаний по причине повышенной вибрации являются: несоответствие размеров посадочных диаметров деталей, вызывающее нарушение требований к посадкам деталей в узлах; повышенный остаточный дисбаланс и

биения узлов; неблагоприятные сочетания геометрических параметров и остаточных дисбалансов деталей и узлов; несоблюдения технических требований (ТТ) при сборке; прочие причины. Наиболее существенные проблемы возникают в каскадах низкого и высокого давлений. Вибрация изделий может быть существенно снижена за счёт повышения геометрической точности и снижения неуравновешенностей составляющих узлов и деталей компрессоров и турбин.

Проведён анализ современного состояния исследований по обеспечению технических показателей производства ГТД, включающий теоретические основы взаимосвязей параметров деталей и узлов с техническими параметрами изделий, теоретические основы решения задач обеспечения точности размерных связей, метрологические основы обеспечения точности измерений. При переходе к цифровому производству характеристики качества изделий подтверждаются на основе измерений. Особую роль в обеспечении качества, надёжности изделий играет геометрическая точность. Использование цифровых технологий в производстве сборочных единиц ГТД позволяет снизить трудоёмкость и погрешности сборки узлов за счёт управления суммированием систематических погрешностей геометрических параметров комплекта деталей и уровень дисбалансов роторов в процессе их сборки при учёте фактического распределения дисбалансов деталей и узлов.

Теоретические основы функциональных связей параметров с эксплуатационными показателями рассматривались в работах: А.И. Якушева, И.В. Ляндона, И.Г. Фридлендера и др. Среди зарубежных исследователей можно отметить А. Zia, М. Mazur, Н. Sasahara, Т. Kandikjan и др. Установление взаимосвязей параметров точности изготовления и технических (функциональных) показателей изделий является сложной междисциплинарной задачей. Такие задачи находятся на стыке конструкторской и технологической сфер деятельности, и зачастую требуют описания функционирования изделий в рабочих условиях. Среди множества показателей качества особую роль в их обеспечении играет геометрическая точность.

Развитием теоретических основ решения задач точности занимались отечественные исследователи: Б.С. Балакшин, Н.А. Бородачев, Н.Г. Бруевич, А.П. Соколовский, А.Н. Гаврилов, В.П. Фираго, В.Н. Кован, В.С. Корсаков, Д.Н. Решетов, И.А. Иващенко, А.С. Шевелев, И.С. Солонин, П.Ф. Дунаев, И.Г. Фридлендер, Б.М. Базров, В.П. Булатов, Ф.И. Демин, Л.Н. Прокофьев, Г.П. Федорченко, О.С. Сурков. К числу зарубежных исследователей относятся: К.В. Chase, А. Requicha, Н. Chen, Н. Wang, М. Mazur, А. Zia, А. Ballu, J.J. Shah, J.K. Davidson, А. J. Qureshi. Выполненные исследования сформировали теоретический задел, позволяющий решать задачи анализа размерных связей в технологических процессах изготовления деталей и их сборки.

Вопросам обеспечения точности сборки узлов посвящены работы В.А. Богуслаева, А.Я. Качана, А.И. Долматова, Е.А. Корневского, В.Ф. Мозгового, Б.Н. Леонова, В.Ю. Ерошкова, В.А. Захарова, В.Ф. Безъязычного, В.В. Непомилуева, М.Е. Ильиной, Е.А. Майоровой, А.Н. Семенова, В.Н. Брюханова, М.Г. Косова, А.А. Гарькавого, А.М. Каца, М.М. Иванова, Г.С. Коняфиева, А.А. Федорова, Е.В. Кожевникова, Е.В. Кононова, В.П. Тимофеева, И.Ф. Кравченко, Э.В. Кондратюка, Г.Б. Филимонихина, Г.И. Пейчева и других учёных. Среди зарубежных исследователей можно отметить J.J. Shah, А. J. Qureshi, Н. Wang, В. Schleich, S. Wartzack и др.

Перспективным направлением совершенствования сборочных процессов является использование технологии виртуальной сборки (В.В. Непомилуев). Прогнозирование сборочных параметров на основе цифровых результатов измерений деталей позволит определять приемлемый или оптимальный варианты сборки, характеризующиеся

допустимыми значениями сборочных параметров. Задачи прогнозирования сборочных параметров узлов требуют учёта отклонений формы и расположения поверхностей деталей, влияющих в ходе сборки на их напряжённо-деформированное состояние, действия силовых факторов, сопряжений множества поверхностей деталей, формирующих единую ось ротора, и других факторов. Анализируя текущее состояние вопроса теории размерных связей, необходимо отметить, что существующие модели не удовлетворяют в полной мере всем требованиям по точности, производительности вычислений и универсальности, которые к ним предъявляет современное производство. Исходными данными для прогнозирования собранного состояния роторов являются измеренная геометрия присоединительных поверхностей деталей и остаточные дисбалансы. Описанием и представлением реальных поверхностей деталей и сборочных единиц занимались отечественные и зарубежные учёные Л.А. Кашуба, D. Whitehouse, V. Muralikrishnan и др. Анализ результатов исследований показывает необходимость развития методов и математических моделей, позволяющих описывать геометрию маложёстких деталей и определять их геометрические параметры.

В метрологических основах обеспечения точности измерений геометрии деталей и узлов, наряду с исследованием физических основ получения величин, особую роль играют методы и модели обработки результатов измерений, а также методики выполнения измерений. В свою очередь, оценка неопределённостей измерений выполняется с применением подхода «Виртуальная координатно-измерительная машина», который реализуется с использованием метода Монте-Карло и рассматривается в трудах E. Traget, R.G. Wilhelm, F. Waldele и др. Определение оптимальных условий выполнения измерений, обеспечивающих требуемую точность контроля при минимально возможной трудоёмкости, исследовалось в работах авторов: S.M. Obeidat, M. Poniatowska, S.B. Acharya. Совершенствование методов и моделей обработки измеренных координат точек поверхностей рассматривалось в работах В.А. Гапшиса, В.Г. Лысенко, О.В. Захарова, В.П. Суслина, А.В. Джунковского, В.Д. Вермеля, D. Whitehouse и др. Основным методом обработки результатов измерений является метод наименьших квадратов (МНК). Использование метода МНК не может гарантировать выполнение принципа подобия «предельных размеров» Тейлора, являющегося основным принципом в теории взаимозаменяемости. Существующие методы и модели в этой связи в полной мере не удовлетворяют предъявляемым требованиям авиационного двигателестроения.

Резюмируя результаты аналитического обзора, можно отметить, что технические показатели производства ГТД могут быть улучшены за счёт повышения управляемости технологическими процессами изготовления деталей и сборки узлов, если принимать во внимание их реальную геометрию. Это возможно обеспечить за счёт разработки методов, позволяющих учитывать реальную геометрию деталей и узлов ГТД, предусматривающих решение задачи обеспечения информационной достаточности представления геометрии в их цифровых моделях. На основании проведённого анализа литературных источников сформулированы задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена изложению основополагающих сведений о понятии, разработке и использовании действительных моделей для повышения технических показателей производства ГТД. В главе решаются задачи определения оптимального взаимного расположения деталей и условий выполнения технологических операций их изготовления, а также сборки узлов с учётом контактного взаимодействия в условиях эксплуатации в составе изделий. Понятие «действительная модель» связано с метрологическими основами, поскольку модель формируется по результатам измерений. Важными рассматриваемыми геометрическими параметрами поверхностей объектов

авиационных двигателей являются: отклонение формы (её случайные и систематические погрешности); параметры расположения поверхностей.

Сформированы принципы разработки и использования действительных моделей объектов на разных этапах производства ГТД.

1. Под принципом информационной достаточности понимается степень детализации или точность представления содержания действительных моделей, позволяющая описывать количественные характеристики исследуемых процессов обработки деталей и сборки узлов с требуемой точностью для решения задачи обеспечения заданных рабочих и эксплуатационных параметров изделий.

2. Под принципом информационной необходимости понимается содержание в действительной модели необходимого (и достаточного) для решения задачи обеспечения: заданных рабочих и эксплуатационных параметров изделий, количественных характеристик деталей и сборок, обеспечивающих их получение в технологических операциях, размерных и функциональных связей между ними.

3. Под принципом целеполагания понимается соответствие содержания действительных моделей поставленным целям и решаемым задачам исследований. Создание и использование действительных моделей деталей и узлов ГТД должно производиться, исходя из решаемых технологических и конструкторских задач. К числу решаемых задач относятся размерный анализ и синтез в технологических процессах изготовления деталей и сборки узлов ГТД, корректировка размерных параметров обработки заготовки, определение оптимальных параметров сборки узлов ГТД и др.

4. Под принципом оперативности управления понимается обеспечение достаточной скорости реакции в системе управления процессами производства ГТД с применением действительной модели. Разрабатываемое программное обеспечение и алгоритмы, использующие действительные модели деталей и узлов ГТД, должны иметь требуемую производительность вычислений, позволяющую формировать актуальные информационные данные для управления производством ГТД.

5. Принцип необходимого и достаточного количества точек контроля и управления процессами производства ГТД. Количество точек контроля и управления процессами производства ГТД должно обеспечивать управляемость параметрами технологических процессов при приемлемых затратах, обеспечивающих достижение требуемых рабочих и эксплуатационных характеристик производимых изделий.

Место и роль действительных моделей деталей и узлов при решении технологических задач описываются структурно-функциональной диаграммой взаимосвязи конструкторских и технологических уровней подготовки производства ГТД (рисунок 1). В строках диаграммы представлены уровни функциональных связей. Столбцы диаграммы включают основные параметры и объекты, необходимые для повышения эксплуатационных и технологических характеристик ГТД. Стрелки 1 – 8 обозначают функциональные связи и решаемые задачи. Нечётным номерам соответствуют задачи анализа, чётным – синтеза параметров подсистем разных уровней. Приведены этапы формирования и использования действительных моделей объектов для решения технологических задач.

Разработана методика создания действительных моделей объектов, описывающая их геометрические параметры. На первом этапе создания действительных моделей объектов выполняется подготовка измеренного массива координат точек поверхностей. В ходе второго этапа выполняется предварительное математическое базирование с целью определения собственной системы координат измеряемого объекта. На третьем этапе производится математическое описание поверхностей деталей посредством

| Уровни | Параметры | Этапы | Связи (задачи) | Функции | Применяемые модели |
|---|--|---|------------------|--|--|
| 1 уровень Эксплуатационные связи | Показатели качества изделий (ПКИ), Сборочные параметры (СП) | Испытаний | ← 1 → | – Прогнозирование ПКИ – Определение требований к сборочным параметрам | – Прогнозирование ПКИ – Определения требований к сборочным параметрам |
| 2 уровень Сборочные связи | Геометрические параметры (ГП) деталей | Технологической подготовки Сборки | 1 2 → | – Прогнозирование сборочных параметров – Синтез требований к сборочным параметрам | – Прогнозирование сборочных параметров – Действительные модели сборочных единиц |
| 3 уровень Связи в деталях | Построение технологического процесса (ТП) и способы обеспечения требований | Технологической подготовки Обработки заготовок | ← 3 4 → | – Размерный анализ в ТП – Размерный синтез в ТП | – Размерных связей в ТП – Действительные модели деталей |
| 4 уровень Связи в технологической системе (ТС) | Параметры, связанные с: –установкой –обработкой –базированием | | ← 5 6 → | – Размерный анализ технологических элементов – Размерный синтез технологических элементов – Коррекция 3D моделей деталей – Обработка и анализ измеренных данных | – Размерных связей в технологических системах – Обработки и анализа измеренных данных – Коррекции управляющих программ оборудования с ЦПУ – Процессы обработки – Аддитивных процессов – Действительные модели заготовок |
| 5 уровень Структурные связи в ТС | Оснастка, оборудование, инструмент и др. элементы ТС | Технологической подготовки Обработки заготовок Заготовительный (аддитивный) | ← 7 8 → | – Анализ влияния первичных факторов – Выбор оптимальной конструкции | – Действительные модели поверхностей деталей – Действительные модели технологической оснастки – Оценки первичных погрешностей |
| 6 уровень Элементов ТС | Установочные и зажимные элементы, обрабатываемый материал ... | | | – Оптимальный выбор условий обработки или вырашивания материалов | – Действительные модели элементов технологической оснастки и технологических систем |
| 7 уровень Материалов | Свойства материала | | | – Уточнение параметров ТО – Уточнение свойств материалов | – Материала |

Рисунок 1 – Структурно-функциональная диаграмма взаимосвязи конструкторской и технологической сфер при создании и производстве специальной техники в условиях цифрового производства

аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей с использованием сплайнов профилей или поверхностей. Поверхности объектов могут описываться полигональными моделями. Четвёртый этап содержит оценку отклонения формы и расположения поверхностей, в том числе сложнопрофильных, а также уточнение базирования. На пятом этапе производится уточнение базирования и оцененных геометрических параметров, исходя из функционального назначения объекта. Заключительный этап содержит проверку достоверности действительной модели.

Разработан метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов, учитывающий сопряжения их поверхностей с помощью введённых понятий «Виртуальная мера» (ВМ) и «Виртуальная комплектная сборка» (ВКС).

Виртуальная мера – это цифровая модель объекта для определения с необходимой и достаточной точностью действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров, содержащая номинальные поверхности для имитации (моделирования) контактного взаимодействия с измеряемым объектом. Для проведения измерений ВМ имеет возможность перемещения в пространстве и/или изменения своих размеров.

Виртуальная комплектная сборка – это совокупность виртуальных мер и/или действительных моделей объектов для определения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров с помощью моделирования контактного взаимодействия, назначения размерных и функциональных связей и обеспечения возможности перемещения и изменения размеров сопрягаемых объектов.

Использование ВМ предусматривает назначение требований к точности, методам и средствам получения действительных размеров деталей для адекватного представления их геометрии в составе узла путём моделирования функциональных и размерных связей изделий при работе технической системы. ВКС расширяет понятие ВМ применительно к операциям сборки узлов. Геометрические параметры деталей и узлов определяются на основе моделирования сопряжений ВМ с измеренными поверхностями деталей. Предложено использование ВМ в статическом и динамическом вариантах. В статическом варианте ВМ не изменяют свои размеры, и имеют возможность имитирования движения с одной или несколькими степенями свободы. В динамическом варианте ВМ могут изменять свой размер и имитировать движения по одной или несколькими степеням свободы. ВКС предназначены для моделирования соединений измеряемых деталей по сопрягаемым поверхностям. Технологии ВМ и ВКС могут использоваться для разработки новых моделей и алгоритмов обработки результатов измерений. Предложена обобщённая методика анализа отклонений геометрии поверхностей деталей и узлов. Технология ВМ позволяет установить связь между отклонениями формы отдельных деталей, с одной стороны, и сборочными параметрами с другой.

Проведены численные эксперименты по виртуальным измерениям поверхностей детали «Проставка» (рисунок 2), в ходе которых генерировались поверхности с различными отклонениями. Исследовалось влияние отклонений формы базовых и контрольных поверхностей детали «Проставка» на её расчётные геометрические параметры, оцениваемые методом МНК и с помощью технологии ВМ на выборке 1200 деталей. Разброс отклонений формы исследуемой выборки поверхностей детали «Проставка» в пересчёте на геометрические параметры составляет 50% от его величины поля допуска (рисунок 3). Исследования проводились с использованием математического описания поверхностей деталей и сборочных единиц, учитывающего отклонения формы и расположения их поверхностей.

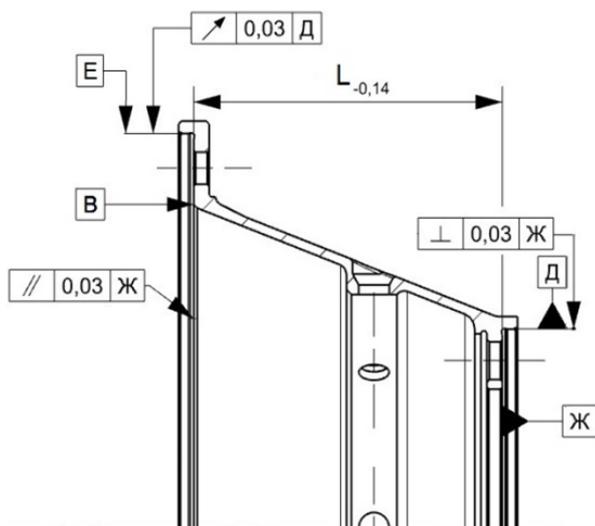


Рисунок 2 – Эскиз и геометрические параметры детали «Проставка»

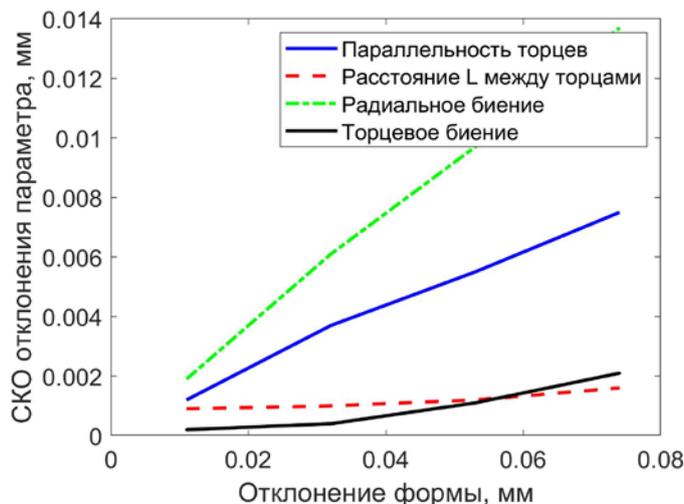


Рисунок 3 – Оценки расхождения измеряемых параметров детали «Проставка»

Величины параллельности торцов и радиального биения поверхностей, полученные с использованием ВМ, точнее на 20% по сравнению с методом МНК, поскольку последний даёт только усредненные характеристики без учёта особенностей макрогеометрии деталей.

Описаны разработанные программные средства для автоматизации создания действительных моделей деталей и технологических объектов.

В **третьей главе** изложены теоретические положения прогнозирования и обеспечения геометрической точности размерных связей при использовании действительных моделей объектов. Предложены метод и комплекс моделей оценки параметров сопряжений деталей и узлов. Метод включает разработку расчётной схемы размерных связей технологического процесса обработки заготовок или сборки узлов, назначение требований к информативности действительных моделей объектов моделирования, определение условий формирования размерных связей, моделирование сопряжений поверхностей объектов, обработку и анализ полученной информации. Производственные погрешности могут быть представлены в виде вариации формы и размеров поверхностей действительных моделей объектов. На рисунке 4, а приведён пример сопряжения двух деталей на основе моделирования производственных погрешностей с использованием действительных моделей.

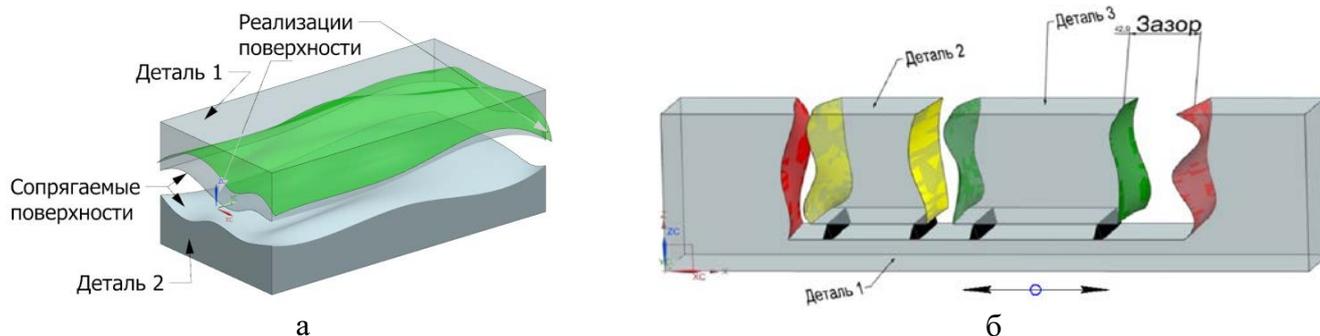


Рисунок 4 – Иллюстрация метода оценки параметров сопряжений деталей и узлов на примере сопряжения двух деталей (а) и образования зазора в соединении трёх деталей (цветом обозначены варианты реализаций поверхностей) (б)

Пример расчётной схемы образования зазора представлен на рисунке 4, б. В схеме представлены действительные модели деталей 1 - 3 как составные звенья размерных связей и модель для расчёта зазора в условиях сборки с учётом контактных взаимодействий поверхностей деталей.

Для оценки геометрических параметров сопряжений поверхностей деталей в зависимости от поставленной задачи используются разработанные модели. Задача оптимизации сборки деталей поясняется рисунком 5. Сборка деталей, определённая в системе координат (СК) O с базисом $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ и началом СК P_0 , включает множество деталей

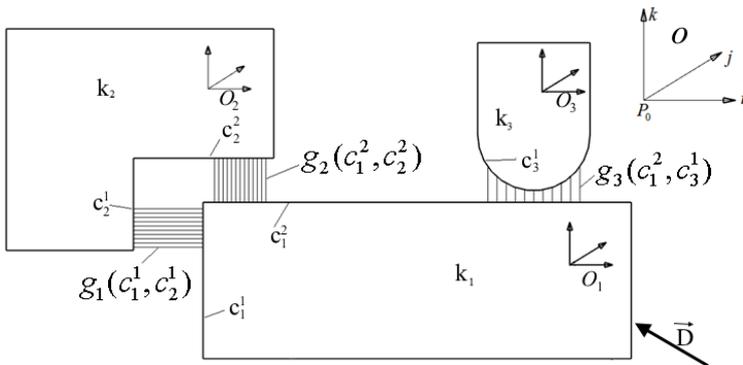


Рисунок 5 – Формализованное описание сборки

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ (1). Для каждой из деталей задана локальная СК O_i с базисом $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$ и началом СК P_{0i} . Каждая деталь k_i включает множество поверхностей $B_i = \{b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^{m_i}\}$ (2). Кроме того, на множестве K определено множество состояний Ω сборки S , элементы которого содержат вектор параметров положения локальных СК

O_i относительно глобальной СК O : $\Omega = \{\omega : \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \omega_i = (dx_i \quad dy_i \quad dz_i \quad \alpha_i \quad \beta_i \quad \gamma_i)^T\}$, (3)

где dx_i, dy_i, dz_i – смещение P_{0i} относительно P_0 ; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – углы разворота базисных векторов $\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i$ относительно $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$. Последовательность переходов сборки может быть определена

в виде дискретных состояний системы: $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, (4). Промежуточным или финальным

состояниям системы сопоставляется множество характеристик качества (целевых показателей) F сборки: $F = \{\{f_i\}, \{f_j^r \rightarrow f_j, f_j^r > f_j\}, \{f_k^r \rightarrow f_k, f_k^r < f_k\}, \dots\}$ (5), где f_m – целевые показатели, численные величины которых могут быть заданы в технических требованиях к узлу или изделию или предписаны другим образом; f_m^r – расчётная (достигнутая)

характеристика качества. Состояния системы должны удовлетворять совокупности ограничений по параметрам состояний: $\Omega_b = \{\{\omega_i^0 \leq \omega_i \leq \omega_i^1\}, \omega_m \in \{\omega_m^0, \omega_m^1, \dots, \omega_m^N\}\}$ (6), где ω_i – вектор параметров i -го рассматриваемого состояния системы; ω_i^0, ω_i^1 – нижнее и верхнее допустимые значения вектора параметров i -го состояния системы соответственно, определяемые конструкцией сборочной единицы или условиями сборки; $\{\omega_m^0, \omega_m^1, \dots, \omega_m^N\}$ – множество допустимых значений состояний системы.

Схемы контактирующих пар деталей представлены в виде упорядоченного множества сопряжений контактирующих поверхностей c_i при сборке: $C = \{\{c_i, c_k\}_n, \{c_i, c_k, c_{k+1}\}_{n+1}, \dots\}; C \subset B$ (7), где $\{c_i, c_k\}_n$ – подмножество контактирующих поверхностей c_i, c_k на n -ом этапе сборки узла, сборочной единицы или изделия.

Каждому подмножеству контактных поверхностей соответствует группа состояний $M_{c_b} = \{m_j\} = \Omega_b \cdot C^T$ (8). Введено понятие функционала качества P , заданного на множестве возможных комбинаций вариантов сборки $M_{c_b} : P(m_j) = \{f_i^r\}$ (9).

Результатом применения P является расчёт одной или нескольких характеристик качества. Достижение целевых характеристик качества f_i определяется как: $f_i^r \rightarrow f_i$ (10), где f_i^r – значение текущих характеристик качества.

Оценка геометрических параметров сопряжений поверхностей абсолютно жёстких деталей производится по двум моделям. Первая модель основана на выполнении наилучшего совмещения поверхностей при ограничениях на их пересечение. Задача наилучшего совмещения поверхностей формализуется в виде:

$$f(R, t) = \frac{1}{n_p} \sum_{ip=1}^N w m_i \left\| R \cdot \bar{p}_{нов2_ip} + \bar{T} - \bar{p}_{нов1_ip} \right\|^2 \rightarrow \min \quad (11), \quad \text{где } n_p - \text{количество точек}$$

совмещения; $\bar{p}_{нов1_ip}$ – вектор координат точки поверхности первого сопрягаемого объекта; R, \bar{T} – матрица поворота и вектор перемещения соответственно; $\bar{p}_{нов2_ip}$ – вектор координат точки поверхности второго сопрягаемого объекта, соответствующий $\bar{p}_{нов1_ip}$; $w m$ – матрица весов. Для решения уравнения (11) применяются методы нелинейной оптимизации. Учитываются ограничения, заключающиеся в исключении пересечений поверхностей (12):

$$\begin{cases} (\bar{p}_{нов2_1} - \bar{p}_{нов1_1})^T \cdot \bar{n}_i \geq 0, \\ \dots \\ (\bar{p}_{нов2_i} - \bar{p}_{нов1_i})^T \cdot \bar{n}_i \geq 0; \end{cases} \quad (12), \quad \text{где } \bar{n}_i - \text{вектор нормали } i - \text{й точки сопрягаемой первой} \\ \text{поверхности. Расстояния между соответствующими} \\ \text{точками поверхностей объектов } \bar{p}_{нов1_ip} \text{ и } \bar{p}_{нов2_ip}$$

формируют зазоры g между ними. Решение, определяемое параметрами R и T , зависит от $w m$ и последовательности выполнения совмещения поверхностей. Последовательность совмещения поверхностей задаётся исходя из анализа сопряжений деталей и соответствия результата экспериментальным данным. Оптимальному состоянию сборки $\omega_{\text{опт}}$ соответствуют минимальные значения зазоров между сопрягаемыми поверхностями, которые определены в соответствии с величинами весовых коэффициентов.

Вторая модель сопряжения поверхностей деталей базируется на численном способе множества сечений. Её целесообразно использовать для деталей, имеющих сопрягаемые отвесные наклонные поверхности, например конусные. Модель решает задачи: 1) определения допустимости состояния сборки деталей; 2) оценки состояния системы; 3) определения оптимального расположения деталей при их сборке. Схема моделирования по второму алгоритму приведена на рисунке 6. Определение допустимости состояния Ω выполняется с помощью кривых Cur_1 и Cur_2 ,

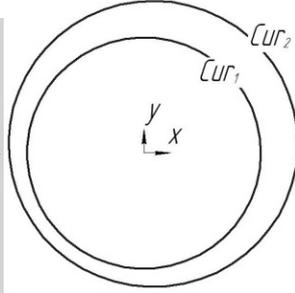
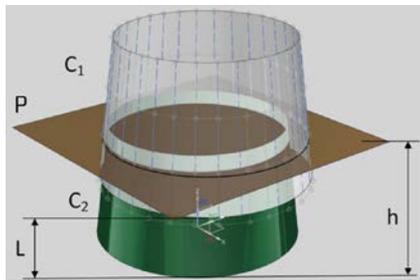


Рисунок 6 – Схема сопрягаемых поверхностей (а) и их сечения (б)

являющихся пересечением поверхностей C_1 и C_2 с плоскостью P . Для допустимого состояния кривые Cur_1 и Cur_2 не должны пересекаться. Утверждение справедливо для любой плоскости P , пересекающей поверхности C_1 и C_2 и удовлетворяющей условию: $h \in [L; \min(H_1, L + H_2)]$, где L – расстояние между границами

поверхностей, h – расстояние от P до границы, H_1 и H_2 – высотный размер поверхностей C_1 и C_2 . Нахождение оптимального положения деталей узла при его сборке выполняется в два этапа: поиск максимального перекрытия L и определение положения, при котором достигается минимальное значение функции зазора между кривыми Cur_1 и Cur_2 . Параметрическая модель рассматриваемой поверхности представлена в виде:

$$\begin{cases} \Delta F = \Delta F(u, v) \\ x(u, v) = (Nx(u, v) + \Delta F(u, v)) \cdot \cos(v) \\ y(u, v) = (Ny(u, v) + \Delta F(u, v)) \cdot \sin(v) \\ z(u, v) = u \end{cases} \quad (13) \quad \text{где } \Delta F - \text{функция отклонения формы поверхности} \\ \text{от её номинального значения; } x(u, v), y(u, v), z(u, v) - \\ \text{координаты точки поверхности; } Nx(u, v), Ny(u, v) - \\ \text{функции, описывающие номинальную форму}$$

профиля поверхности; u, v – параметры поверхности. Для конусной поверхности

$$Nx(u, v) = Ny(u, v) = \frac{R_2 - R_1}{H} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot H}{R_2 - R_1} + H - u \right) \quad (14), \quad \text{где } R_1, R_2, H - \text{радиусы конусной}$$

поверхности и её высота соответственно. Поиск величины максимального перекрытия выполняется с использованием алгоритма, основанного на последовательном перемещении сопрягаемой поверхности в направлении уменьшения L и подборе координат вектора совмещения.

Разработана методика моделирования сопряжений поверхностей деталей на основе использования метода конечных элементов (КЭ), включающая восемь этапов: 1) анализ сборочной единицы, выявление сопрягаемых поверхностей деталей и технических требований к ним, анализ конструкции и технологии сборки узлов, определение метода, условий и характеристик процесса сборки; 2) определение геометрических отклонений по статистическим наблюдениям (данные обобщаются с целью их распространения на партию или серию изготавливаемых деталей); 3) создание действительных моделей деталей на основе архивных данных, либо по результатам измерений; 4) разработка расчётной схемы, включающей действительные модели сопрягаемых деталей, приложенные к ним нагрузки и систему ограничений; 5) анализ расчётной схемы и формирование моделей расчёта сборочных параметров узла; 6) разработка КЭ модели собираемой системы; 7) расчёты с использованием КЭ модели; 8) обработка результатов моделирования (решение задачи корреляционно-регрессионного анализа).

Проверка достоверности разработанных моделей выполнялась с использованием макетов и натуральных образцов деталей «диск» и «проставка» ротора турбины. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических экспериментов производилось по геометрическим параметрам: расстоянию между торцами, торцевому и радиальному биениям, амплитуде и величинам отклонений формы в контрольных точках поверхности до и после сборки узла. Величина расхождения результатов теоретических и экспериментальных исследований для рассмотренных параметров не превышает 25%. Расчёт сборочных геометрических параметров узлов с учётом сопряжений поверхностей деталей, как это выполняется в предлагаемом методе, позволит повысить их точность оценки не менее чем на 25% по сравнению с использованием размерных цепей посредством учёта сопряжений поверхностей деталей. Неопределённость, вносимая сопряжением поверхностей деталей при расчёте размерных цепей, может составлять до 33%, что определяется требованием по соотношению допустимого отклонения формы поверхности и допуска на её размер.

Приведен метод оценки параметров сопряжений деталей на основе использования технологий машинного обучения, позволяющий оперативно оценивать геометрические параметры размерных связей в цеховых условиях. Метод включает три этапа: 1) определение влияющих факторов; 2) формирование структуры модели на основе анализа требований к универсальности, применимости, обобщающей способности, производительности и точности моделирования; 3) формирование обучающих и тестовых выборок; обучение моделей. Применительно к процессу сборки предусмотрены модели: сборки узла и сопряжений его деталей. На рисунке 7 приведено пояснение к предложенному методу.

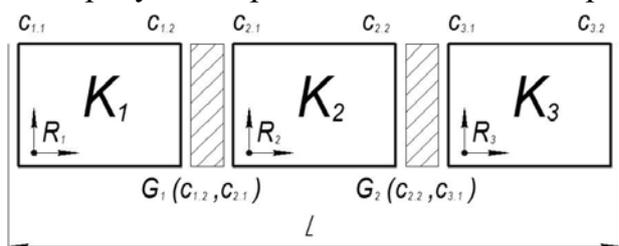


Рисунок 7 – Пояснение к методу оценки сопряжений деталей с использованием машинного обучения

Представлена схема размерных связей трёх деталей, формирующих параметр L между поверхностями $C_{1.1}$ и $C_{3.2}$. Детали сопрягаются между собой по поверхностям и формируют соответствующие функции зазоров $G_1(C_{1.2}, C_{2.1})$ и $G_2(C_{2.2}, C_{3.1})$.

Формируемые модели сопряжений деталей узла M_1 , M_2 предназначены для оценки размерного параметра L , определяемого, исходя из параметров поверхностей $V_{1.1}, V_{3.2}$. На рисунке 8, а приведено пояснение формирования модели сопряжений деталей узла.

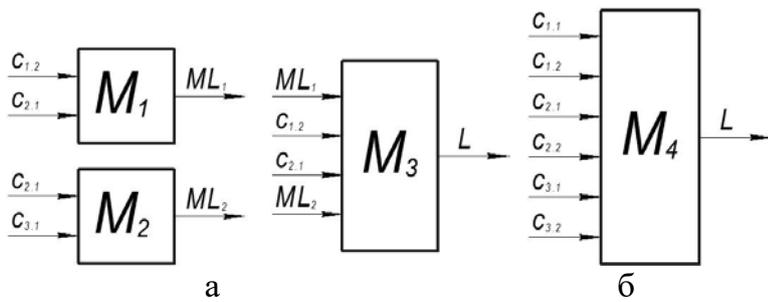


Рисунок 8 – Формирование моделей сборки узла (а) и сопряжений его деталей (б)

Модель сборки узла M_4 позволяет оценивать параметр L на основе информации о поверхностях деталей $C_{1,1}$, $C_{1,2}$, $C_{2,1}$, $C_{2,2}$, $C_{3,1}$ и $C_{3,2}$, как показано на рисунке 8, б.

Необходимая точность наблюдается при использовании многослойного перцептрона,

радиально-базисной и свёрточной структур. Наилучшие результаты обучения наблюдаются для глубоких нейросетевых моделей, включающих свёрточные структуры. Использование глубоких нейросетевых моделей формирует семантику, описывающую особенности геометрических отклонений поверхностей деталей и их сопряжений.

Приводится метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Предусматривается цифровое моделирование сопряжений деталей и определение варианта коррекции поверхностей, исходя из наилучшего соответствия заданным величинам сборочных параметров. Метод состоит из трёх этапов, определяющих предварительное расположение деталей, уточнённое расположение деталей и параметры доводки сопрягаемых поверхностей деталей. Уточнённое расположение деталей определяется, исходя из уменьшения погрешностей сборочных параметров узла. Используется целевая функция: $K = \sum_{j=1}^N |AsP_j - [AsP_j]| / T_{AsP_j} \rightarrow \min$ (15), где AsP_j – j -й сборочный параметр ротора; $[AsP_j]$ – допустимое значение параметра; T_{AsP_j} – допуск сборочного параметра. Определяются корректировки к параметрам расположения деталей при выполнении сборки узла: $Adj = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \alpha \ \Delta \beta \ \Delta \gamma)$ (16), где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – перемещения соответственно по осям x, y и z ; $\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma$ – углы поворотов вокруг осей x, y и z . Учитываются ограничения на недопустимость пересечений поверхностей и допуски на сборочные параметры узла: $AsP \leq [AsP] \in R$ (17). Параметры операции пригонки деталей (уточнение положения деталей за счет удаления микрообъёмов материала) вычисляются на третьем этапе (рисунок 9).

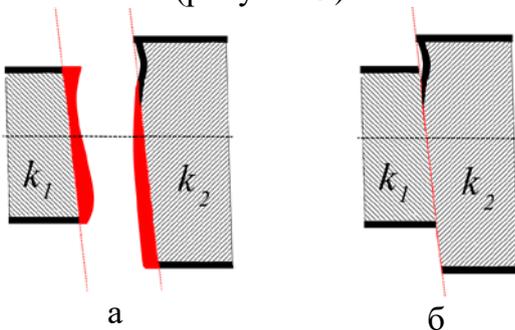


Рисунок 9 – Детали до (а) и после (б) выполнения операции пригонки

Определение припуска на каждой из сопрягаемых поверхностей выполняется путём нахождения двух параллельных секущих плоскостей Pl_{SEC}^1 и Pl_{SEC}^2 , минимизирующих объём снимаемого материала при соблюдении требуемого уровня контакта поверхностей. Найденные параметры могут быть использованы при обработке сопрягаемых поверхностей деталей на оборудовании с ЧПУ, что повысит точность сборочных параметров узлов.

Приведено описание обобщённой методики цифровой коррекции формообразования поверхностей заготовок с применением их действительных моделей для повышения точности обработки заготовок и точности сборки узлов.

Четвёртая глава посвящена прогнозированию и снижению неуравновешенностей роторов с использованием их действительных моделей.

Предложен метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели. Идея балансировки ротора с использованием цифровой модели состоит в выборе относительных взаимных угловых положений деталей, при которых обеспечивается противонаправленность возмущающего воздействия от их неуравновешенностей и определение величин корректировочных масс. Уменьшение суммарной неуравновешенности ротора выполняется по значениям виброскоростей на опорах двигателя, получаемых с помощью цифровой модели изделия. На рисунке 10 приведена схема, поясняющая предложенную идею.

Для расчёта суммарного дисбаланса пары деталей k_1, k_2 необходимо и достаточно иметь контактные поверхности b_1, b_2 , координаты сосредоточенных масс x_1, y_1, x_2, y_2 и их значения m_1, m_2 , возможные линейные ω_x, ω_y и угловые ω_α перемещения поверхностей и центров масс. Необходимо учитывать внешние силовые факторы F , возникающие от затяжки болтовых соединений, запрессовки и др. Исходные данные о деталях получают посредством измерения их геометрии и дисбалансов. В процессе измерения дисбалансов

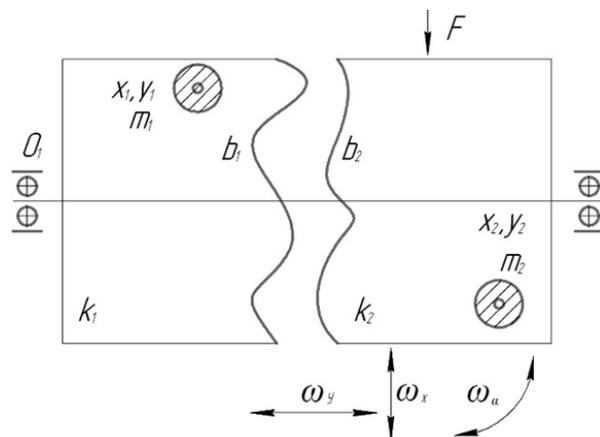


Рисунок 10 – Схема предлагаемого подхода

определяются величины и угловые положения сосредоточенных масс относительно поверхностей деталей и оси вращения ротора O_1 . На основе измерений координат точек поверхностей формируются триангуляционные или сплайновые модели основных поверхностей деталей. Выполняется расчёт векторов и моментов нагрузок, возникающих при контактном взаимодействии поверхностей деталей и возможные перемещения координат их центров масс. Полученные данные используются для построения упрощённой модели, содержащей номинальные поверхности и координаты сосредоточенных масс. Упрощённая модель может использоваться для определения суммарной величины дисбаланса узла, его главной центральной оси инерции или уровня вибраций на опорах. Рассмотрена математическая формулировка предложенного метода. Критерием качества балансировки ротора являются значения виброскоростей на опорах двигателя:

$$K_r = \sum_{j=1}^k v_j St_j \rightarrow \min \quad (18).$$

Где St_j – величина виброскоростей j -ой опоры ротора; v_j – вес важности j -й опоры ротора; k – количество опор. Изменяемыми параметрами являются относительные угловые положения деталей, которые представлены в виде множества:

$$PP = \{\alpha p_1, \alpha p_2, \alpha p_3, \dots, \alpha p_l\} \quad (19),$$

где αp_i – относительное угловое положение i -й детали. Для параметров αp_i указываются их допустимые значения, определяемые конструкциями деталей. Формируется множество возможных состояний собираемого ротора:

$$S = \{s : \alpha p_i \in V_{\alpha p_i}\}, \quad V_{\alpha p_i} = \{\alpha p_i^1, \alpha p_i^2, \dots, \alpha p_i^{n_i}\} \quad (20).$$

Метод снижения уровня неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели можно представить в форме:

$$\{\alpha p_i^{opt}\}_{S, V_{\alpha p_i}} = \arg \min \{K_r^j\} \quad (21),$$

где каждому j -ому угловому положению детали i соответствуют значения целевой функции балансировки K_r^j (22). Реализация метода включает два этапа. На первом этапе производится поиск начального приближения для определения углов αp_i^{opt} с использованием модели балансировки,

рассматривающей ротор как абсолютно жёсткое тело без учёта погрешностей, возникающих при сопряжении деталей. На втором этапе выполняется определение углов αp_i^{opt} с использованием конечно-элементной модели, учитывающей деформации ротора. Для реализации предложенного метода разработаны специализированные методики и алгоритмы.

Приводится описание модели, используемой на первом этапе. Дисбаланс ротора и его центробежные моменты инерции как узла, состоящего из нескольких $i = 1 \dots N$ деталей сборочной единицы (ДСЕ), уменьшаются за счёт оптимизации углового положения φ_i каждой i -ой ДСЕ относительно оси вращения ротора. Локальная система координат O_i' каждой i -ой ДСЕ включает ось \overline{OX}_i' , совпадающую с осью \overline{OX} глобальной системы координат O (рисунок 11).

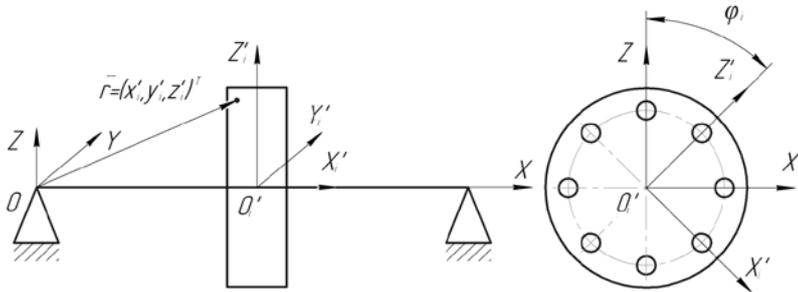


Рисунок 11 – Принятые системы координат в роторе

Радиус-вектор i -ой материальной точки ДСЕ в глобальной системе координат $\vec{r} = (x_i, y_i, z_i)^T$, а в локальной системе координат O_i' представляется в виде: $\vec{r} = (x_i', y_i', z_i')^T$. Локальная система координат O_i' может быть повернута вместе с i -ой ДСЕ на любой угол φ_i относительно глобальной системы O .

Условия равенства нулю главного вектора и главного момента неуравновешенных сил, учитывающих углы разворота $\{\varphi_i\}$, $i = 1 \dots N$ каждой ДСЕ, могут быть заданы в виде:

$$\begin{cases} J_{xy} = \sum_{i=1}^N \rho_i (\cos \varphi_i (J_{xy}')_i + \sin \varphi_i (J_{xz}')_i) \rightarrow 0 \\ J_{xz} = \sum_{i=1}^N \rho_i (\cos \varphi_i (J_{xz}')_i - \sin \varphi_i (J_{xy}')_i) \rightarrow 0 \\ D_y = \sum_{i=1}^N (\cos \varphi_i (D_y')_i + \sin \varphi_i (D_z')_i) \rightarrow 0 \\ D_z = \sum_{i=1}^N (\cos \varphi_i (D_z')_i - \sin \varphi_i (D_y')_i) \rightarrow 0 \end{cases} \quad (23),$$

$$\begin{cases} (J_{xy})_i = \int_{V_i} x'_i y'_i dV \\ (J_{xz})_i = \int_{V_i} x'_i z'_i dV \\ (D_y')_i = \int_{V_i} y'_i \rho_i dV \\ (D_z')_i = \int_{V_i} z'_i \rho_i dV \end{cases} \quad (24) \quad \begin{cases} \text{– центробежные} \\ \text{моменты инерции} \\ \text{каждой } i\text{-ой ДСЕ;} \\ \\ \text{– дисбалансы } i\text{-ой} \\ \text{ДСЕ в локальной} \\ \text{системе координат} \\ \text{детали.} \end{cases} \quad (25)$$

Поскольку углы φ_i могут принимать фиксированные значения, то учитывается условие: $\{\varphi_i\} = \{\frac{2\pi}{k_i} n_i \mid \forall n_i : n_i = 1 \vee 2 \vee 3 \dots \vee k_i, i = 1 \dots N\}$ (26), где k_i – количество отверстий в i -ой ДСЕ.

Остаточная неуравновешенность, определяемая значениями параметров J_{xy}, J_{xz}, D_y, D_z , после решения системы (23) устраняется за счёт размещения грузов массой m_1 и m_2 в плоскостях коррекции 1 и 2 с координатами $x = x_1$ и $x = x_2$ соответственно

(рисунок 11). Грузы с неизвестными массами m_1 и m_2 , находящиеся соответственно на заданных радиусах r_1 и r_2 , а также неизвестных углах α_1, α_2 , определяются, исходя из системы уравнений (27).

$$\begin{cases} J_{xy} - m_1 x_1 r_1 \cos \alpha_1 + m_2 x_2 r_2 \cos \alpha_2 = 0 \\ J_{xz} - m_1 x_1 r_1 \sin \alpha_1 + m_2 x_2 r_2 \sin \alpha_2 = 0 \\ D_y - m_1 r_1 \cos \alpha_1 + m_2 r_2 \cos \alpha_2 = 0 \\ D_z - m_1 r_1 \sin \alpha_1 + m_2 r_2 \sin \alpha_2 = 0 \end{cases} \quad (27)$$

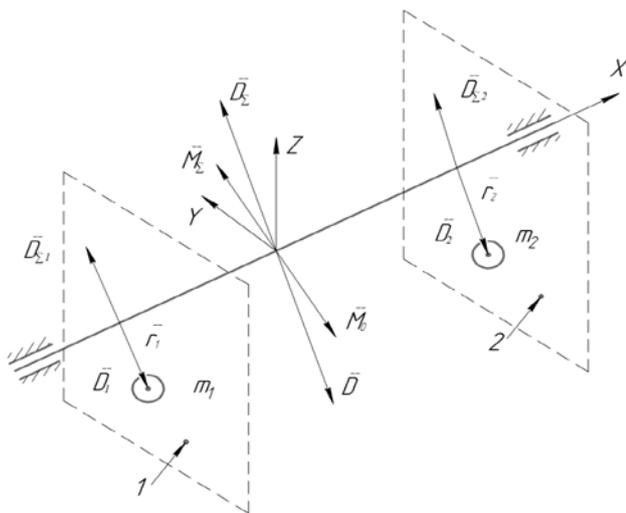


Рисунок 12 – Схема расположения корректировочных масс в 2-х плоскостях коррекции

Суммарные дисбаланс $\bar{D}_\Sigma = \bar{D}_{\Sigma 1} + \bar{D}_{\Sigma 2}$ и момент \bar{M}_Σ представлены на рисунке 12 двумя векторами.

Разработан алгоритм формирования параметрических действительных моделей роторов, предназначенных для оценки уровня их дисбалансов при условии, что они являются жёсткими. Параметрическая действительная модель ротора учитывает его номинальную геометрию, отклонения геометрических сборочных параметров и неуравновешенности деталей.

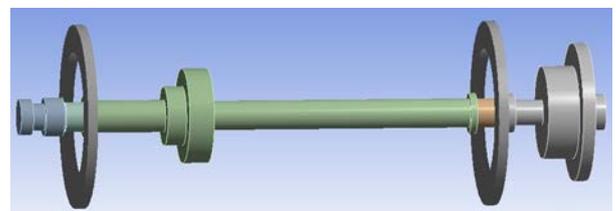
На втором этапе определяются углы αp_i^{opt} с использованием конечно-элементной модели (КЭМ) ротора турбины низкого давления, учитывающей его деформации. В качестве нулевого приближения используются углы

$\varphi_i, \alpha_1, \alpha_2$, определённые на первом этапе. Создание КЭМ ротора турбины низкого давления выполнялось с использованием параметрической модели, разработанной в САД модуле программной системы NX, и модулях Modal и Harmonic Response программной системы Ansys Workbench. В модуле Harmonic Response определяются амплитудно-частотные характеристики, деформации и виброскорости на опорах ротора. Интеграция параметрической и КЭМ моделей, управление процессом вычислений выполнялись посредством информационной системы, включающей модули: определения геометрических параметров по результатам измерений для формирования действительных 3D моделей ротора; формирования действительных 3D моделей ротора турбины; виртуального уравнивания 3D модели сборочной единицы; расчёта эксплуатационных параметров (например, уровня вибраций); управления проведением расчётов.

Верификация разработанных моделей выполнялась с использованием имитатора ротора турбины низкого давления (ТНД), который воспроизводит его размеры в масштабированном виде и содержит: вал, диск и две ступицы для установки диска и образования плоскостей коррекции. Внешние виды имитатора ротора для исследования вынужденных колебаний и его КЭМ приведены на рисунках 13, а и 13, б.



а)



б)

Рисунок 13 – Внешний вид имитатора ротора турбины низкого давления (а) и его конечно-элементной модели (б)

Имитатор ротора позволяет воспроизводить погрешности сборки и балансировки ротора турбины низкого давления с учётом существующей технологии сборки и балансировки. Виброскорости на опорах и изгибные формы колебаний имитатора ротора исследовались с

использованием разгонно-балансирующего стенда. При частоте вращения имитатора ротора 8000 об/мин максимальная величина его деформации составляет 0,02 мм. Расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований по уровню вибраций на опорах ротора не превысило 17% для рассмотренных частот вращения ротора 2115, 4286 и 7909 об/мин.

Проводились теоретические исследования влияния неуравновешенностей и углового положения деталей ротора на величины виброскоростей его опор относительно исходного уровня вибраций. Исходный уровень вибраций определялся при отсутствии неуравновешенностей деталей ротора. Значения неуравновешенностей деталей обозначены номерами 2, 4, 6 и 8 и соответствуют величинам 10, 40, 120 и 200 г·см. Ротор имеет три критические частоты: 50, 75, 110 Гц. На рисунках 14, а и 14, б приведены зависимости относительных значений виброскоростей первой опоры двигателя от угловых положений деталей и величин остаточного дисбаланса деталей для угловой частоты вращения 100 Гц.

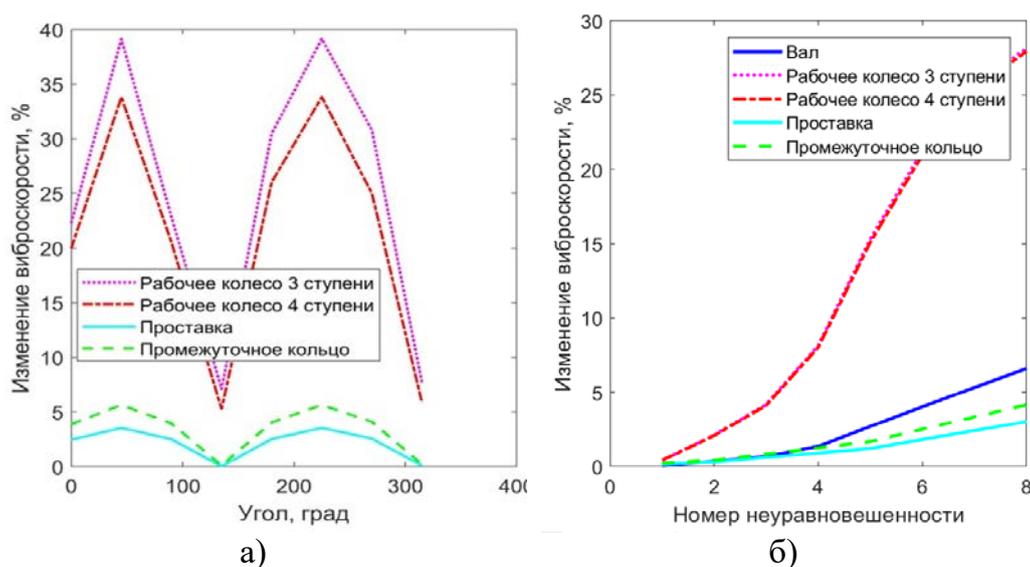


Рисунок 14 – Зависимости относительных значений виброскоростей первой опоры от углового положения деталей (а) и остаточного дисбаланса деталей (б)

Наибольшее влияние на величину вибрации оказывают остаточные дисбалансы деталей исследуемого ротора, имитирующих вал и рабочие колёса третьей и четвёртой ступеней. Увеличение остаточного дисбаланса ротора сказывается на уровне его вибрации, которая повышается с увеличением частоты вращения от нескольких процентов при 20 Гц до десятков процентов при 100 Гц и до ста процентов при 160 Гц. Определены рациональные угловые положения деталей, позволяющие снизить уровень вибрации до 30%, как видно из рисунка 14, а удалось снизить уровень вибрации ротора с 35% до 5%.

Определение вибраций роторов по результатам измерений деталей в цеховых условиях может выполняться с использованием технологии машинного обучения на основе расчётных данных, полученных с использованием КЭМ исследуемого ротора. Обучены нейронные сети двух типов: обобщённо-регрессионная нейронная сеть (GRNN, Generalized Regression Neural Networks), однонаправленная сеть с двумя слоями. Входными параметрами нейронных сетей являются векторы смещений деталей относительно номинального положения и остаточных дисбалансов. Выходными параметрами являются относительные значения виброскоростей опор. Разработанные модели формируют каскадную модель и используются для выбора рационального варианта сборки ротора.

В пятой главе описаны технологические решения для производства сборочных единиц ротора низкого давления, основанные на использовании действительных моделей и

ориентированные для применения в цифровом производстве. Анализировалась сборка роторов турбины и компрессора низкого давления (КНД).

Приведены результаты экспериментальных исследований геометрических отклонений сопрягаемых поверхностей деталей рассматриваемых роторов. Обобщённые радиальные профили отклонений формы поверхностей деталей роторов представлены на рисунках 15, а и 15, б.

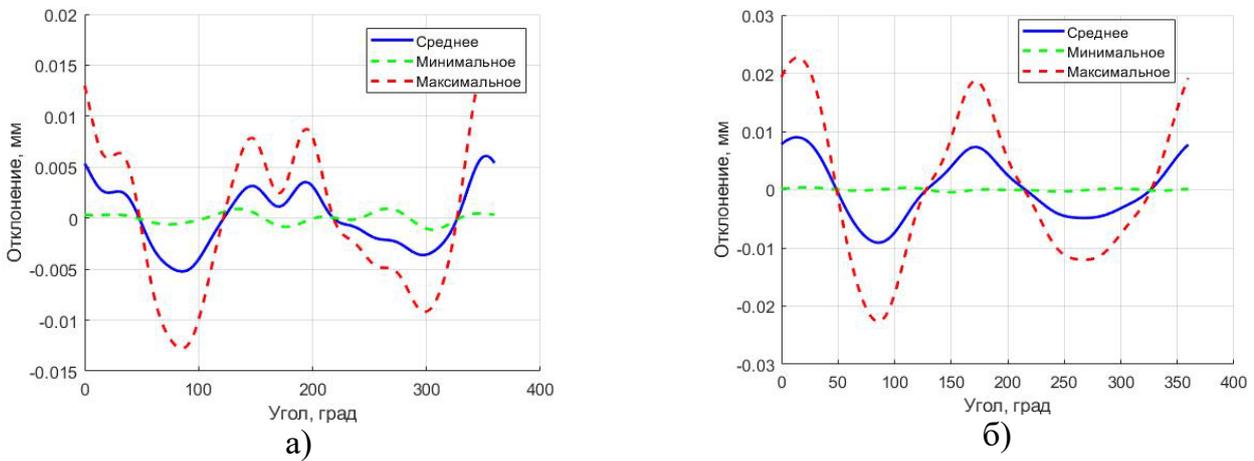


Рисунок 15 – Радиальные профили отклонений формы цилиндрических (а) и торцевых (б) поверхностей деталей роторов

Анализ профилей, представленных на рисунках 15, а и 15, б, показывает преобладание овальности на радиальных поверхностях и сочетания вогнутости и выпуклости на торцевых поверхностях.

Отклонения формы торцевых и цилиндрических поверхностей сопрягаемых деталей представлялись в виде гармонического ряда: $\delta_n(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \sin(k \cdot (2 \cdot \pi \cdot x / \tau + \theta_k) + (1 + (-1)^k) \cdot \pi / 2)$

(28), где A_k – набор амплитуд членов гармонического ряда; θ_k – фазы членов гармонического ряда; τ – длина всей кривой; x – текущая длина кривой от начальной до текущей точек. Для описания отклонений формы поверхностей с погрешностью не более 4 мкм использовалось 8 членов тригонометрического ряда.

Информация по моделям возможных реализаций отклонений формы поверхностей использовалась для решения задач: выбора минимальной достаточности объёма измеряемых точек поверхностей, при котором обеспечивается представление действительных моделей деталей роторов с требуемой точностью; отладки математической модели определения рациональных условий выполнения сборки; определения характера и топологии зависимостей геометрических сборочных параметров ротора при учёте отклонений формы поверхностей комплектов деталей.

Предлагаемая математическая модель нахождения рациональных условий выполнения операций сборки роторов предназначена для определения относительных угловых положений деталей в роторе согласно комплекточной ведомости. Изменяемые параметры в операции сборки описываются множеством (19). Каждый вариант сборки описывается множеством, компоненты которого содержат значения указанных параметров (20). Конструктивные особенности деталей ограничивают допустимые значения параметров и формируют множество возможных состояний сборки:

$S = \{s : \alpha P_i \in V_{\alpha P_i}, rP_j \in V_{rP_j}\}, \quad V_{\alpha P_i} = \{\alpha P_i^1, \alpha P_i^2, \dots, \alpha P_i^{n_i}\}, \quad V_{rP_j} = [rP_j^{\min}, rP_j^{\max}] \quad (29).$ После выполнения сборки определяется множество параметров качества сборки –

$QP = \{qp_1, qp_2, \dots, qp_n\}$ (30) и вектор, содержащий вычисленные значения данных параметров $q = (qP_1, qP_2, \dots, qP_n)$ (31). Во время стендовых испытаний изделия и его эксплуатации фиксируются значения эксплуатационных параметров – $EP = \{ep_1, ep_2, \dots, ep_k\}$ и $r = (eP_1, eP_2, \dots, eP_k)$ (32). Рациональный вариант сборки предлагается определять, исходя из трёх критериев.

Первый критерий предусматривает наилучшее соответствие заданным параметрам качества сборки узла: $K_q = \sum_{j=1}^n w_j |qP_j - qP_j^*| / T_{qp_j} \rightarrow \min$ (33), где qP_j^* – номинальное значение параметра qP_j , T_{qp_j} и w_j – допуск и его весовой коэффициент на j -й параметр качества сборки соответственно.

Второй критерий предусматривает наилучшее соответствие заданным требованиям к рабочим и эксплуатационным параметрам изделия: $K_r = \sum_{j=1}^k v_j |eP_j - eP_j^*| / T_{ep_j} \rightarrow \min$ (34), где eP_j^* – номинальное значение параметра eP_j , T_{ep_j} и v_j – допуск и параметр предпочтительности на j -й эксплуатационный параметр ротора соответственно.

Третий критерий является смешанным и предусматривает компромиссное решение по достижению наиболее значимых параметров качества и эксплуатационных параметров узла. Используется сводный критерий: $K_\Sigma = \nu_q K_q + \nu_r K_r \rightarrow \min$ (35), где ν_q и ν_r – коэффициенты значимости представленных критериев соответственно.

Определение рациональных параметров сборки роторов (радиальных биений дисков и других геометрических параметров) формулируется как задача нелинейной оптимизации, которая решается с использованием моделей прогнозирования геометрических размерных связей и величин дисбалансов, изложенных в главах 2, 3 и 4.

В основу реализации технологии сборки ТНД и КНД положены теоретико-экспериментальные исследования, в ходе которых выполнялось измерение геометрии комплекта деталей узлов, создавались их действительные модели. С использованием модели оценки сборочных параметров ротора выполнялась их оценка для различных взаимных угловых положений деталей, производилась сборка узла, измерялись сборочные параметры. Сравнивались величины сборочных параметров, полученных в ходе измерений и моделирования. Производилось определение оптимальных условий сборки деталей, к которым относятся взаимные угловые положения деталей. На рисунке 16, а представлены деформации ротора ТНД при его сборке. Сборка ротора ТНД представлена на рисунке 16, б.

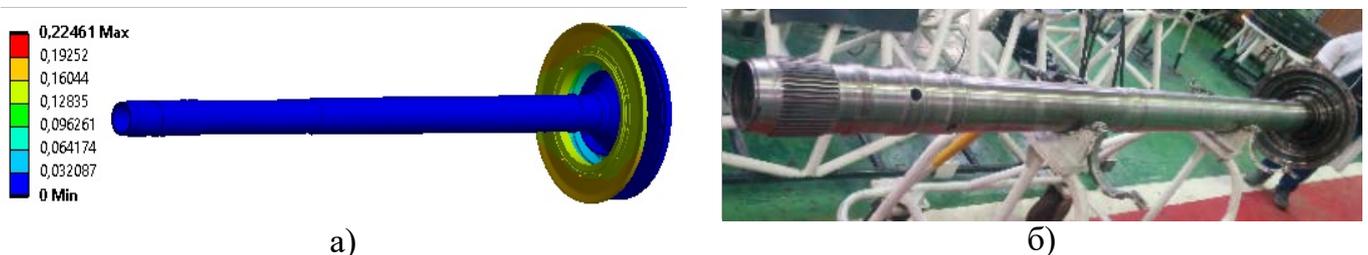
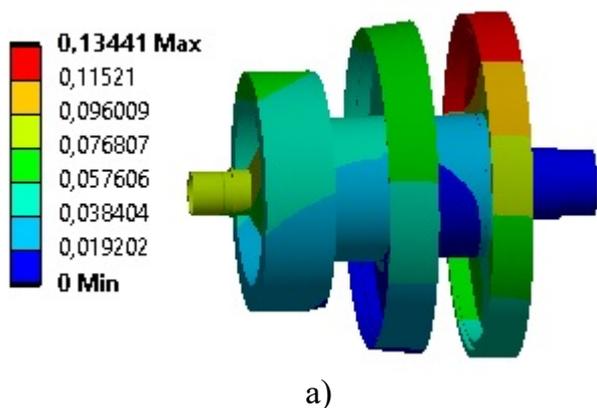


Рисунок 16 – Расчетные деформации ротора ТНД при его сборке в мм (а) и фотография сборки ротора ТНД (б)

На рисунке 17, а представлены деформации ротора КНД при его сборке. Сборка ротора КНД представлена на рисунке 17, б. Анализ деформаций, представленных на рисунке 17, а, показывает их неравномерность, что является следствием торцевых и радиальных биений сопрягаемых поверхностей ДСЕ. Величины деформаций значимые, увеличиваются к периферии дисков и не превышают 0,2 мм.



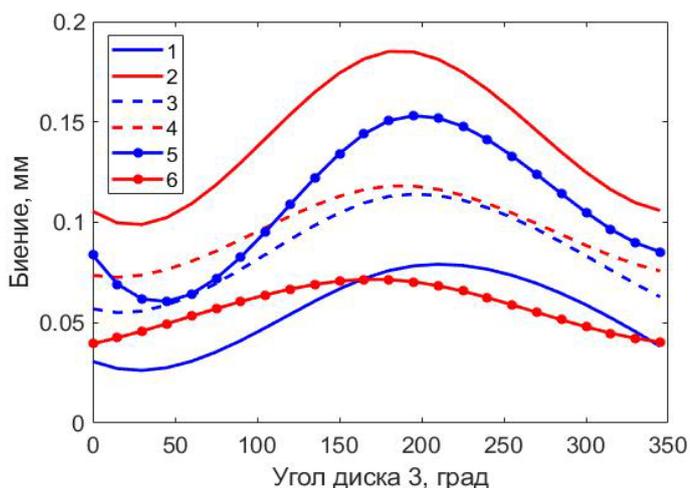
а)

б)

Рисунок 17 – Расчетные деформации ротора КНД при его сборке в мм (а) и фотография сборки ротора КНД (б)

Аналогичная картина наблюдается для расчётных деформаций, представленных на рисунке 17, а. Дальнейший анализ выполнялся на основе результатов вычисления радиальных и торцевых биений по контрольным поверхностям дисков.

Отработка технологических решений выполнялась при сборке роторов ТНД и КНД без лопаток. Суммарный дисбаланс ротора может быть учтён на основе данных балансировки рабочих колёс в сборе с лопатками. На рисунке 18 приведены зависимости сборочных параметров ротора компрессора низкого давления от относительного углового



1, 3, 5 – радиальные биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;

2, 4, 6 – торцевые биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней

Рисунок 18 – Сборочные параметры ротора компрессора низкого давления

положения диска третьей ступени.

Анализ полученных зависимостей показывает их монотонный характер и гармоническую форму, которая может быть представлена в виде тригонометрического ряда. Принимая во внимание характер и форму названных зависимостей, в работе использовались методы простого перебора, последовательного квадратичного программирования и др.

Расхождения между оценёнными и измеренными в эксперименте радиальными и торцевыми биениями ротора КНД в трёх этапах его сборки, включающих присоединение 3, 2 и 1 ступеней в среднем составляет 15%.

Определялись оптимальные условия выполнения сборки ротора по трём критериям (33), (34) и (35). На рисунке 19 приведены результаты определения оптимальных условий сборки ротора КНД. Соответствующими столбиками по каждому сборочному параметру обозначены результаты нахождения рационального решения по трём критериям. Первый критерий (K_q (33)) рассчитывался с учётом торцевых и радиальных биений ротора. Второй критерий (K_r (34)) рассчитывался с учётом дисбалансов ротора. Третий критерий (K_Σ (35)) рассчитывался с учётом биений и дисбалансов ротора. Применение критерия K_q (33)

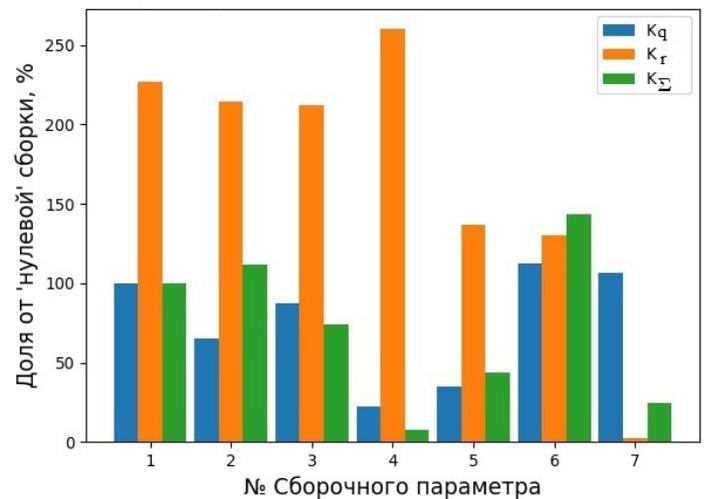
позволило уменьшить торцевые и радиальные биения ротора до 76% и величину его суммарного дисбаланса на 62%. Использование критерия K_r (34) приводит к повышению

биений ротора и снижению его суммарного дисбаланса почти на 100%. Применение компромиссного критерия K_Σ (35) позволяет уменьшить торцевые и радиальные биения ротора в среднем на 23%, а величина суммарного дисбаланса снижается на 80%. Сборку ротора целесообразно выполнять по угловым положениям, полученным с использованием компромиссного критерия K_Σ (35). Достигнутое повышение точности сборочных параметров затруднительно получить экспериментальным подбором, поскольку количество вариантов сборки рассматриваемых роторов более 331 тысяч.

Экономический эффект от внедрения разработанных решений при сборке одного ротора КНД из 7 деталей ($n_{дем} = 7$) оценивался на основе исходных

трудоемкостей сборки и балансировки ротора – $t_{сб}, t_{бал}$, коэффициентах их снижения: $k_{t_{сб}}, k_{t_{бал}}$, исходной трудоемкости измерений – $t_{из}$ деталей и коэффициента её роста – $k_{t_{изм}}$, цеховой стоимости нормо-часов операций сборки, балансировки и измерений на координатно-измерительной машине – $C_{ч_{сб}}, C_{ч_{бал}}, C_{ч_{изм}}$. Снижение технологической себестоимости определялось по формуле: $\Delta_T = C_{ч_{сб}} \cdot t_{сб} \cdot k_{t_{сб}} + C_{ч_{бал}} \cdot t_{бал} \cdot k_{t_{бал}} - n_{дем} \cdot C_{ч_{изм}} \cdot t_{из} \cdot k_{t_{изм}}$ (36). Расчёт производственных затрат на годовую программу из 30 изделий показал их снижение на 3 161 250 руб. При традиционных, не управляемых с помощью цифровых моделей технологиях сборки, вероятность нахождения оптимального углового положения деталей ротора при регламентированных четырёх (k) экспериментальных переборках положений деталей с количеством отверстий $n_{отв} = 24$ для каждой детали равна: $P = k/n_{отв}^{n_{дем}-1}$, что составляет всего $2 \cdot 10^{-8}$. Величина $n_{отв}^{n_{дем}-1}$ представляет предельное количество возможных сборок ротора. Использование разработанных моделей позволит снизить количество предварительных сборок с 4 до 2, что сократит трудоемкость процесса сборки не менее чем на 25%.

Заключительная часть пятой главы содержит изложение двух инженерных методик. Первая инженерная методика описывает последовательность внедрения предлагаемых в работе технологических решений, основанных на цифровом моделировании технологических операций и процессов с использованием действительных моделей, на участках сборки и балансировки. Вторая инженерная методика описывает укрупнённую последовательность использования технологических решений на рабочих местах контролёров деталей и сборщиков роторов.



1, 3, 5 – радиальные биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;
 2, 4, 6 – торцевые биения соответственно по дискам 1, 2 и 3 ступеней;
 7 – общий дисбаланс ротора
 Рисунок 19 – Результаты определения оптимальных условий сборки ротора

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена крупная научная проблема, имеющая важное значение для развития авиационного двигателестроения, направленная на повышение технологических характеристик двигателей в условиях цифрового производства применительно к операциям сборки и доводки. Можно выделить следующие основные результаты, полученные в ходе работы:

1. Предложена научная идея, сформулированы основные принципы, предусматривающие разработку и сквозное использование действительных моделей объектов при решении технологических задач обеспечения качества при производстве и ремонте ГТД. Разработаны базовые принципы использования действительных моделей деталей и узлов для повышения управляемости технологий производства ГТД, а также повышения точности и производительности операций сборки. Обоснованы содержание и применимость действительных моделей деталей и узлов ГТД в процессе технологической подготовки и производства изделий.

2. Разработана обобщённая методика создания действительных моделей деталей и узлов ГТД по результатам их измерений. Решена задача определения необходимого и достаточного объёма измеренных данных для создания действительных моделей деталей и узлов ГТД применительно к операциям сборки роторов.

3. Разработан метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью ВМ и КВС, учитывающий сопряжения контактирующих поверхностей объектов. Метод позволяет повысить точность оценки действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов на 20% по сравнению с существующими технологиями. Использование метода при создании действительных моделей деталей и узлов позволит учитывать особенности формируемых размерных связей, определяемых возможными сопряжениями контактирующих поверхностей измеряемых объектов.

4. Разработан метод, включающий комплекс моделей для оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, основанный на создании и использовании действительных моделей объектов, обеспечивающий повышение точности расчётов сборочных параметров. Метод позволяет определять геометрические параметры сопряжений деталей при допущении их абсолютной жёсткости при учёте податливости технической системы собираемое изделие – технологическое оснащение. Проведены теоретико-экспериментальные исследования геометрических сопряжений деталей при их контактном взаимодействии на основе статистически обоснованных возможных вариантов геометрии контактирующих поверхностей. Исследования показывают, что точность расчёта биений ротора в сборе при применении метода увеличилась на 25% по сравнению с методом размерных цепей.

5. Предложен метод повышения точности сборки узлов за счёт расчёта параметров операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей. Повышение точности сборки узлов достигается расчётом оптимального взаимного расположения деталей и микрообъемов удаляемого металла при пригонке поверхностей. Применение метода на операциях доводки при сборке узлов ГТД позволяет обеспечивать требуемую площадь контакта поверхностей.

6. Предложен метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, учитывающий геометрические погрешности и неуравновешенности деталей с использованием действительных моделей деталей и узлов роторов. В результате обеспечивается снижение уровня вибраций роторов на опорах за

счёт выбора рационального углового положения деталей и узлов, позволяющего компенсировать возмущающие воздействия от их неуравновешенностей. Показано, что использование предложенного метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД позволит уменьшить вибрации на опорах ГТД в процессе его сборки не менее чем на 30% посредством учёта производственных погрешностей входящих в него деталей и узлов.

7. Разработана и верифицирована модель определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД. Результативность применения модели оценивалась по сравнению с технологиями, включающими предварительные сборки узлов. Определённые относительные угловые положения деталей ротора компрессора низкого давления позволяют снизить погрешности сборочных параметров (торцевых и радиальных биений рабочих колес) в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% по сравнению со сборкой ротора с произвольным положением ДСЕ в окружном направлении. Использование результатов моделирования позволит снизить трудоемкость сборки за счёт сокращения количества предварительныхборок с 4 до 2.

Таким образом, поставленная цель достигнута и может считаться выполненной в полном объёме. Комплекс разработанных методов, моделей и программных средств позволяет повысить точность технологических размерных расчётов, сборки узлов ГТД, снизить трудоёмкость выполнения упомянутых технологических операций, уменьшить уровень вибраций изделий. Предложенные методики и алгоритмы позволяют решать практические задачи для обеспечения точности и производительности изготовления деталей, а также сборки узлов ГТД, и предназначены для использования инженерно-техническим персоналом предприятий авиадвигателестроительной отрасли.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Болотов, М.А.** Модели и методы оптимизации методик измерения деталей ГТД при их контроле на координатно-измерительных машинах / **М.А. Болотов, И.А. Лёзин** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 2 (26). – С. 140-149.

2. **Болотов, М.А.** Разработка технологии контроля геометрических параметров ГТД комплексной системы обеспечения качества, основанной на использовании современных средств измерений / **М.А. Болотов, И.Л. Шитарев** // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. – 2011. – № 2 (20). – С. 39-44.

3. **Болотов, М.А.** Моделирование технологических процессов при производстве сложных изделий авиакосмической техники: проблемы и пути их решения / **М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, О.С. Сурков** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 3-2 (34). – С. 146-150.

4. **Болотов, М.А.** Погрешности контактных измерительных средств станков с ЧПУ при контроле геометрических параметров изделий / **М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, О.С. Сурков, Н.В. Рузанов, И.В. Папсуев** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 3-2 (34). – С. 157-163.

5. **Болотов, М.А.** Повышение точности оценки отклонения расположения в координатных измерениях профилей лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя / **М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов** // Вестник Самарского

государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2014. – № 5-3 (47). – С. 202-211.

6. Печенин, В.А. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина // Измерительная техника. – 2015. – №3. – С. 18-23.

7. Печенин, В.А. Сравнительное исследование алгоритмов измерения геометрии сложных профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов, Е.Р. Степанова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14. – № 3-2. – С. 438-447.

8. Печенин, В.А. Модель анализа и классификации геометрии лопаток газотурбинных двигателей / Печенин В.А., **Болотов М.А.** // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – т.22, №2. – С.55-65.

9. Печенин, В.А. Погрешности базирования при координатных измерениях цилиндрических зубчатых колёс / В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Вестник машиностроения. – 2016. – №5. – С. 47-50.

10. **Болотов, М.А.** Определение неопределённостей измерения параметров профиля лопаток компрессора ГТД / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов // СТИН. – 2016. – №6. – С.34-40.

11. Печенин, В.А. Исследование неопределённостей измерений геометрических параметров профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), – 2016. – т.15, №2. – С.162-170.

12. **Болотов, М.А.** Метод оценки неопределённостей пространственного сопряжения высокоточных оптических и механических деталей / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 360-369.

13. **Болотов, М.А.** Модель сопряжения деталей с коническими поверхностями / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, И.А. Грачев, И.В. Щербаков // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 28-33.

14. Печенин, В.А. Модель распознавания элементов геометрии пера лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2018. – № 3. – С. 102-108.

15. Елисеев, Ю.С. Прогнозирование погрешностей сборки изделий с использованием действительных моделей деталей / Ю.С. Елисеев, **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, И.А. Грачев, Е.В. Кудашов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – т. 18, №2. – С. 128-137.

16. **Болотов, М.А.** Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Е.Ю. Печенина, Н.В. Рузанов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 18-27.

17. Дилигенский, Д.С. Разработка методики оценки параметров посадки упругих колец демпфера опоры ротора / Д.С. Дилигенский, Д.К. Новиков, В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2020. – № 1. – С. 44-50.

18. Грачев, И.А. Модель оценки торцевых биений ротора с параллельными связями деталей / И.А. Грачев, Е.В. Кудашов, **М.А. Болотов**, Н.Д. Проничев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 83-96.

19. Хаймович, А.И. Модель виртуального уравнивания жёстких роторов / А.И. Хаймович, М.А. Болотов, Е.Ю. Печенина // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Том 21. № 1. – С. 99-109.

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus/Web of Science

20. **Bolotov, M.A.** Modeling of coordinate measuring geometrical parameters form and location complexity profile of compressor blade GTE / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Vol. 9, Issue 12. – P. 1143-1148.

21. Pechenin, V.A. Development of a method of ICP algorithm accuracy improvement during shaped profiles and surfaces control / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // International Journal of Engineering and Technology. – 2014. – Т. 6. № 5. – P. 2229-2235.

22. **Bolotov, M.A.** Information model for estimate of the geometric parameters between the surfaces trapezoidal shape in the measurements of compressor blades of GTE / M.A. Bolotov, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, N.D. Pronichev // 2015 5th International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE. – 2015. – P. 208-212.

23. Pechenin, V.A. Technique of Decomposition of Form Deviation for Freeform Surface / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 685. – P. 334-339.

24. **Bolotov, M.A.** Model of mating of parts with nominal coaxial surfaces of rotation / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin // Journal of Materials and Environmental Science. – 2016. – 7 (9). – P. 3431-3436.

25. Pechenin, V.A. Determination of the bilateral filter's parameters for the analysis of surface geometry deviations / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, E.R. Stepanova // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – V. 1638. – P. 386-392.

26. Pechenin, V.A. Mathematical models for forecast of geometrical parameters of assembly units / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – V. 1904. – P. 23-28.

27. **Bolotov, M.A.** Investigation of the vibration state of the turbine rotor taking into account the influence of geometric accuracy of parts / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, E.Yu. Kolchina // MATEC Web of Conferences. – 2018. – 224. – 02085.

28. **Bolotov, M.A.** Prediction of the vibration state of the GTE turbine rotor taking into account the influence of the geometric accuracy of parts / **M.A. Bolotov**, E.J. Kolchina, V.A. Pechenin, N.D. Pronichev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – 450(2). – 022022.

29. **Bolotov, M.A.** Predicting geometric parameters of assemblies with neural network models / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, I.A. Grachev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – 1096(1). – 012198.

30. Ruzanov, N.V. The model for estimating the measurement error in geometric parameters of complex surfaces / N.V. Ruzanov, **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096, Issue 1. – 012163.

31. **Bolotov, M.A.** Neural network model in digital prediction of geometric parameters for relative position of the aircraft engine parts / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, D.M. Balyakin // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – V. 2416– p. 87-94.

32. **Bolotov, M.A.** Surface recognition of machine parts based on the results of optical scanning / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, E.Yu. Kolchina // CEUR Workshop Proceedings, 2391. – 2019. – p. 342-349.

33. **Bolotov, M.A.** Information model and software architecture for the implementation of the digital twin of the turbine rotor / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, I.A. Grachev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1368(5). – 052013.

34. **Bolotov, M.A.** Technological features of aircraft engine repair in digital production / **M.A. Bolotov**, I.A. Grachev, E.V. Kudashov, V.A. Pechenin, N.D. Pronichev, // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1399(4), 044114.

35. **Bolotov, M.A.** Issues for Virtual Simulation of Complex Assemblies / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, D.M. Balyakin // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – 8933940.

36. **Bolotov, M.A.** Simulation for Pretensioning Bolted-Type Connections of High – Loaded Assembly Units / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, I.A. Grachev, E.V. Kudashov // 2019 International Multi -Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. – 2019. – 8934112.

37. Grachev, I.A. Problems and ways to reduce measurement uncertainties in evaluating the geometric assembly parameters of gas turbine engine assemblies / I.A. Grachev, **M.A. Bolotov**, E.V. Kudashov, V.A. Pechenin // IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. – 2020. С. 52035.

38. **Bolotov, M.A.** Simulation of a gas turbine engine rotor assembly / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, D.M. Balyakin, E.Yu. Pechenina // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. P. 012024.

39. Grachev I. A., **Bolotov M.A.**, Pechenin V.A. etc. Comparative analysis of simulation options for the real geometry of the surfaces of gas turbine engine parts // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745. Issue 1.

40. **Bolotov M.A.**, Pechenin V.A., Ruzanov N.V. etc. Methods for determining the location parameters of GTE blade profiles based on their measurement results // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745. Issue 1.

41. **Bolotov M.A.**, Pechenin V.A., Yu Pechenina E. etc. Digital model to optimize the rotor assembly for aircraft engine compressor models // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1745. Issue 1.

42. Grachev I. A., Kudashov E. V., **Bolotov M.A.** etc. Parameterized FEM for estimation of product unit assembly parameters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1047. Issue 1.

Публикации в других изданиях

43. Печенин, В. А. Разработка модели оценки погрешностей измерений углового расположения отверстий в дисках и валах ГТД с использованием метода "максимум-минимум" / В. А. Печенин, **М. А. Болотов**. – Текст: непосредственный // Самолетостроение России. Проблемы и перспективы : Симпозиум с международным участием, Самара, 02–05 июля 2012 года / Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет). – Самара: СГАУ, 2012. – С. 315-317.

44. Рузанов, Н. В. Теоретико-вероятностная модель для оценки сборочных параметров изделий / Н. В. Рузанов, **М. А. Болотов**, В. А. Печенин. – Текст: непосредственный // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017) : сборник трудов III международной конференции и молодежной школы, Самара, 25–27 апреля 2017 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – Самара: Новая техника, 2017. – С. 1063-1068.

45. Нейросетевая модель в цифровом прогнозировании геометрических параметров относительного положения деталей авиационных двигателей / **М. А. Болотов**, В. А. Печенин, Н. В. Рузанов, Д. М. Балякин. – Текст: непосредственный // Сборник трудов ИТНТ-2019, Самара, 21–24 мая 2019 года. Том 4. – Самара: Новая техника, 2019. – С. 608-616.

46. Информационная модель и архитектура программной системы для реализации цифрового двойника ротора турбины / **М. А. Болотов**, В. А. Печенин, Н. В. Рузанов, И. А. Грачев. – Текст: непосредственный // Сборник трудов ИТНТ-2019, Самара, 21–24 мая 2019 года. Том 4. – Самара: Новая техника, 2019. – С. 833-842.

47. Балякин, Д. М. Разработка геометрических моделей изделий по результатам их измерений в "умных" фабриках будущего / Д. М. Балякин, В. А. Печенин, **М. А. Болотов**. – Текст: непосредственный // Международная молодёжная научная конференция “XV Королёвские чтения”: посвящённая 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова : тезисы докладов, Самара, 08–10 октября 2019 года. Том 1. – Самара: Издательство СНЦ, 2019. – С. 263-264.

48. Методика обработки данных сканирования для создания действительных моделей деталей / Н. С. Голев, Е. В. Кудашов, Е. Ю. Печенина [и др.]. – Текст: непосредственный // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : Сборник научных статей по итогам девятой международной научной конференции, Казань, 31 октября 2019 года. Часть 1. – Казань: КОНВЕРТ, 2019. – С. 55-57.

49. Болотов, М. А. Прогнозирование вибраций ротора газотурбинного двигателя / М. А. Болотов, В. А. Печенин, Е. Ю. Печенина. – Текст: непосредственный // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Тамбов, 16–18 октября 2019 года. Том 1, выпуск 6. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 223-229.

50. Исследование вибрационных параметров ротора с использованием технологии виртуальной балансировки / Е. Ю. Печенина, В. А. Печенин, М. А. Болотов, Н. Д. Проничев. – Текст: непосредственный // Машиностроение: инновационные аспекты развития : Материалы III международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13 марта 2020 года. Том 3. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 55-60.